

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Савченко Сергея Павловича «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук диссертационная работа С.П.Савченко посвящена изучению спиновых и магнитоупругих волн в ферро- и антиферромагнетиках вблизи особых точек спин-волнового спектра, таких, как границы первой зоны Бриллюэна, окрестность магнитоупругого и электронно-ядерного резонансов. В указанных областях спектр спиновых волн обладает особенностями: направления групповой и фазовых скоростей волн оказываются различными, формируются направления преимущественного распространения спиновых волн, возникает самофокусировка.

Актуальность решаемой задачи связана с современным развитием магноники — раздела науки, одной из основных задач которой является изучение способов передачи и обработки информации с помощью спиновых волн. Преимуществами использования устройств магноники перед полупроводниковыми вычислительными устройствами являются: отсутствие джоулевого тепла, что приводит к большим длинам свободного пробега магнонов; низкие длины спиновых волн, что позволяет масштабировать магнонные устройства до наноскопических размеров; широкий диапазон частот вплоть до терагерцового; волновые свойства. К волновым свойствам как раз и относятся явления фокусировки и каустики, которые рассматриваются в работе. Поэтому тема работы актуальна, а появление работ Савченко С.П., на которых основана его диссертация, было весьма важным и своевременным.

Научная новизна диссертационной работы заключается в том, что в ней детально проанализировано влияние эллиптичности образцов на спектр связанных электронно-ядерных колебаний в легкоосных ферромагнетиках. впервые изучена анизотропия спектра спиновых волн в различных магнитоупорядоченных материалах: гейзенберговских ферро- и антиферромагнетиках с различным отношением обменных постоянных и различным типом кристаллической решетки, в упруго-изотропных ферромагнетиках, - и установлены условия, при которых в этих системах возможна каустика магнонов, а также проанализированы способы управления направлением каустики при помощи частоты

волны и внешнего магнитного поля. Полученные результаты имеют важное научное и практическое значение.

Рецензируемая диссертационная работа состоит из Введения, 4-х глав, Заключения, и 2-х приложений.

Первая глава диссертации является обзорной и содержит базовые сведения об основных взаимодействиях в ферромагнетиках. В главе сформулированы условия, при которых справедливо феноменологическое приближение для описания магнитной динамики. Формулы из главы 1 используются в следующих главах работы.

Во второй главе приведены результаты исследования связанных электронно-ядерных колебаний в легкоосных ферромагнитных образцах, имеющих форму эллипсоида вращения. Подобная задача для сферических образцов решалась ранее (см. например Phys.Rev. В **154**, 446 (1967)). Савченко С.П. использует, по существу, ту же модель, но исследовались образцы более сложной формы и задача существенно усложнилась в математическом отношении: необходимо было перейти к сфероидальным координатам, работать с присоединенными функциями Лежандра первого и второго рода с действительными и мнимыми аргументами. Кроме того, сфероидальные координаты для сжатого сфероида отличаются от координат для вытянутого, и не переходят в сферические. Поэтому автору пришлось решать три различные математические задачи, и при этом следить за тем, чтобы решения задачи — собственные частоты, — менялись гладким образом при переходе от сжатого сфероида к сфере и к вытянутому сфероиду. В результате проведенного детального и трудоемкого исследования получены два значимых результата. Во-первых, проанализирована зависимость положения запрещенной зоны колебаний от отношения полуосей эллипсоида. Наличие запрещенной зоны — диапазона полей, в которых невозможны собственные колебания — для спектра связанных колебаний не является новым эффектом. Однако в главе 2 установлено, где именно будут границы запрещенной зоны для эллипсоида с заданным соотношением полуосей. Во-вторых, исследован вопрос о вырождении колебаний: при определенном магнитном поле две различные собственные моды имеют совпадающие частоты. Достижением автора является то, что он приводит конкретные указания: если задан параметр формы, то можно определить величины поля и частоты вырождения.

В третьей главе диссертации содержится исследование спиновых волн в гейзенберговских ферро- и антиферромагнетиках с учетом влияния вторых соседей. В качестве базовых выбраны редкоземельные ферромагнетики EuO и EuS , и антиферромагнетик MnF_2 , характеризующиеся тем, что в них величина обменного

взаимодействия спина со вторым ближайшим соседом имеет тот же порядок, что и с первым. При этом отношение обменных постоянных для EuO и MnF_2 положительно, а для EuS — отрицательно. Установлено, что в EuO и MnF_2 фокусировка спиновых волн проявляется слабо и только для волн с волновыми числами вблизи границы зоны Бриллюэна, тогда как в EuS (отрицательное отношение обменных постоянных) эффекты фокусировки значительны, и возможна каустика спиновых волн. После рассмотрения базовых веществ в главе 3 проводится теоретическое исследование каустики магнонов в ферромагнетиках с различными типами кристаллической решетки (простая кубическая, ОЦК, ГЦК) и в антиферромагнетиках с ОЦТ-решеткой, с различными отношениями обменных постоянных. В результате исследования автор получает ряд важных результатов, отраженных в выводах к главе: установлено, что каустика магнонов возможна лишь в веществах с отрицательным отношением обменных постоянных, получены диапазоны частот, в которых возможна каустика магнонов, а также определены зависимости границ этого диапазона от обменных постоянных, исследованы зависимости направлений каустик от частоты волны.

В четвертой главе диссертации исследуются магнитоупругие волны в железиттриевом гранате (ЖИГ), который приближенно можно считать упруго-изотропным. Здесь используется феноменологическая модель описания, учитывающая обменное взаимодействие, анизотропию, магнитное дипольное и магнитоупругое взаимодействие. Модель не является новой, спектр спиновых волн для нее известен. Здесь уместно вспомнить работы Евгения Акимовича Турова. Обычно в этих задачах рассматривают магнитоупругие волны, распространяющиеся вдоль симметричных направлений $[100]$, $[110]$, $[111]$. Новизна этой части работы заключается в том, что в представленной диссертации направление распространения волн считается произвольным, и рассматриваются волны с частотами вблизи магнитоупругого резонанса. В этих условиях, как показано в главе 4, в узкой области частот поведение волн сильно анизотропно, и возможно формирование каустики, причем направление каустики оказывается не совпадающим ни с одним из симметричных направлений. В отличие от результатов главы 3, здесь особенности поведения спиновых волн могут наблюдаться на частотах и длинах волн, удобных для экспериментального исследования.

Работа оставляет хорошее впечатление, текст написан четко и ясно, детально анализируются ограничения теории и приближения, результаты хорошо иллюстрированы, как базовые выбраны конкретные материалы с хорошо известными параметрами, а не

гипотетические, что редкость для теоретических работ, автор использует различные аналитические и численные методы, что в целом говорит о высокой квалификации Савченко С.П.

Научная и практическая значимость работы определяется ее результатами, которые могут быть систематизированы следующим образом:

Во-первых, исследованы условия, при которых возможна каустика спиновых волн в ферро- и антиферромагнетиках с различными типами кристаллической решетки. Найденные зависимости диапазонов частот каустики от отношения обменных постоянных, и зависимости направлений каустик от частоты могут оказаться полезными при разработке устройств, использующих для передачи информации спиновые волны.

Во-вторых, показано, что каустика возможна и для магнитоупругих волн, причем в хорошо изученном веществе — ЖИГ, и при экспериментально реализуемых параметрах. При этом ожидается, что в пленках ЖИГ каустика может реализоваться в достаточно широком диапазоне частот, а направление каустики меняется в широких пределах.

В-третьих, получен ряд результатов по связанным электронно-ядерным колебаниям в сфероидальных ферромагнитных образцах, представляющих интерес для планирования и объяснения результатов эксперимента: зависимости частот и полей вырождения от отношения полуосей сфероида. Найденные зависимости положения запрещенной для электронно-ядерных колебаний зоны магнитных полей от отношения полуосей сфероида могут быть полезны при разработке устройств спинтроники.

По работе имеются следующие замечания и пожелания:

1. Первая глава диссертации содержит подробный обзор, но при этом содержит только базовые сведения. Приводятся только ссылки на предшествующие работы, соответствующие выполненной в диссертации, но отсутствует их детальный анализ. Например, задача о связанных магнитостатических волнах в электронно-ядерной системе для сферы решена в Phys.Rev. B **154**, 446 (1967). Автору следовало бы привести подробно ее результаты и потом в главе 2 сравнить, что принципиально нового дал учет эллиптичности. Тоже самое касается фокусировки. В работе приведены ссылки на литературу по фокусировке фононов, но отсутствует анализ того, что видели и считали разные команды, нет выводов о том, чем задача фокусировки магнонов отличается от фокусировки фононов.

2. Пункт 4.1 диссертации - вывод дисперсионного соотношения для магнитоупругих волн, следовало бы привести не в оригинальной части, а в обзоре. Представленная модель была уже многократно изучена ранее, и полученный в диссертации закон дисперсии спиновых волн можно найти в ряде источников, в том числе и цитируемых в диссертации.
3. Во всех главах диссертации не учитывается затухание магнонов (релаксационный член в уравнении Ландау-Лифшица). Разумеется, его учет - очень трудная задача, но необходимо было обсудить возможные следствия. На мой взгляд затухание в значительной степени нивелирует результаты главы 4, существенно сузив возможности наблюдения каустики, и частично и главы 3.
4. В главе 4 диссертации фигурирует точечный источник магнитоупругих волн, но нет обсуждения того, как можно (и можно ли вообще) создать такой источник?
5. В работе имеется незначительное количество опечаток и не совсем корректное использование терминов. Так автор использует некорректный термин "точка Кюри" вместо "температура Кюри", "спиново-поляризованный" вместо "спин-поляризованный"

Отмеченные замечания не снижают общей высокой оценки выполненных Савченко С.П. исследований, и ни в коей мере не влияют на результаты и выводы работы.

Достоверность результатов обеспечивается обоснованностью принятых приближений и допущений, использованием в работе проверенных и апробированных аналитических и численных методов, совпадением предельных переходов с известными ранее результатами.

Полученные результаты могут быть использованы в Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова, в Институте физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН, в Институте радиотехники и электроники РАН, в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе РАН, в Башкирском государственном университете, в Уральском федеральном университете им. первого Президента России Н.Б. Ельцина, как при постановке теоретических исследований, так и при планировании соответствующих экспериментов.

Текст автореферата точно и полностью соответствуют содержанию диссертации. Публикации автора достаточно полно отражают содержание диссертации и результаты прошли апробацию на Всероссийских и международных конференциях.

Резюмирую сказанное. Диссертационная работа Савченко Сергея Павловича «Фокусировка, каустика и вырождение спиновых волн в магнитоупорядоченных средах», представленная на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений, посвящена актуальной теме и в ней получены новые результаты, обладающие научной и практической значимостью, она является завершенной научно-квалификационной работой, вносящей существенный вклад в развитие представлений о волновых свойствах спиновых волн в магнитоупорядоченных средах, и в особенности каустики и фокусировки спиновых волн.

Работа удовлетворяет всем требованиям п. 9 Постановления Правительства РФ № 842 от 24 сентября 2013 г «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор – Савченко Сергей Павлович несомненно заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12 – физика магнитных явлений.

Официальный оппонент,

доктор физ.-мат. наук, профессор

06.09.2021.

А.Б. Грановский

Александр Борисович Грановский,
профессор кафедры магнетизма Физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
119991, Российская Федерация, г Москва, Ленинские горы, д. 1 , стр. 2
тел.: +7 495 939-47-87, e-mail: granov@magn.ru

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н., проф. Грановского А.Б. удостоверяю

Декан
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова
профессор

Н.Н. Сысоев

С отзывом ознакомлен 13.09.2021

Савченко С.П.

Сведения об официальном оппоненте

ФИО: Грановский Александр Борисович

Ученая степень, звание: доктор физико-математических наук, специальность 01.04.11 – физика магнитных явлений, профессор кафедры магнетизма Московского государственного университета. г. Москва

Полное наименование организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Должность: профессор кафедры магнетизма

Почтовый адрес: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д.1, стр.2, МГУ им. М.В.Ломоносова, Физический факультет, кафедра магнетизма.

Тел.: +7 (495) 9394787

E-mail: granov@magn.ru

Публикации в сфере исследований, которым посвящена диссертация

1. Блинов М.И., Черненко В.А., Прудников В.Н., Асегуинолаза И.Р., Барандиаран Ж.М., Лахдеранта Э., Ховайло В.В., Грановский А.Б., Магнитотранспортные свойства тонких пленок $Ni_{49.7}Fe_{17.4}Co_{4.2}Ga_{28.7}$ // Журнал экспериментальной и теоретической физики, том 159, № 3, с. 546-552 (2021)
2. Пикалов А.М., Дорофеев А.В., Грановский А.Б. Плазмон-магнонное взаимодействие в системе графен-антиферромагнитный диэлектрик // Письма в "Журнал экспериментальной и теоретической физики", т. 113, № 7-8(4), с. 527-532 (2021)
3. Aryal Anil, Dubenko Igor, Pandey Sudip, Chen Jing-Han, Talapatra Saikat, Chlan Vojtech, Stepankova Helena, Matveev Vladimir, Blinov Mikhail, Prudnikov Valerii, Granovsky Alexander, Lähderanta Erkki, Stadler Shane, Ali Naushad. NMR studies of the ground states of $Ni_{50-x}Co_xMn_{35}In_{15}$ ($x=1, 2.5$) and $Ni_{45}Co_5Mn_{37}In_{13}$ Heusler alloys // AIP advances, т. 10, № 1, с. 015328 (2020)
4. Pikalov Anton M., Dorofeenko Alexander V., Granovsky Alexander B. Double magnonic chains of particles: Spin waves slowing and snaking // Journal of Magnetism and Magnetic Materials, т. 500, с. 166351 (2020)
5. Taichi Goto, Takuya Yoshimoto, Kei Shimada, Caroline Ross, Koji Sekiguchi, Alexander Granovsky, Yuichi Nakamura, Mitsuteru Inoue Hironaga Uchida. Forward volume spin wave interference in thin yttrium iron garnet films // Scientific reports, т. 9, с. 16472 (2019)

Д.ф.-м.н., профессор

Грановский А.Б.

Подпись профессора кафедры магнетизма физического факультета МГУ, д.ф.-м.н., профессора Грановского А.Б. удостоверяю

Ведущий специалист
по кадрам

Корнишова Р.М.

11.1

✓ 8

